

# Die Schweiz auf dem Weg zur tiefgreifenden Dekarbonisierung

Es ist möglich, die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energieverbrauch bis zum Jahr 2050 auf jährlich eine Tonne pro Einwohner zu begrenzen. Verschiedene Szenarien zeigen, dass die damit verbundenen Kosten für die Wirtschaft verkraftbar sind. *Philippe Thalmann, Marc Vielle*

**Abstract** Können die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus dem Energieverbrauch pro Einwohner, die heute bei jährlich 5,1 Tonnen liegen, bis ins Jahr 2050 auf eine Tonne reduziert werden? Um dies zu überprüfen, hat die ETH Lausanne ein Referenzszenario definiert, das einzig von den bereits beschlossenen Massnahmen bis 2050 ausgeht. Da diese nicht ausreichen, um das angestrebte Ziel zu erreichen, wurden drei weitere Szenarien für den Zeitraum von 2021 bis 2050 erarbeitet. Allen Szenarien ist gemeinsam, dass statt Anreizmechanismen eine umfassende CO<sub>2</sub>-Abgabe zur Anwendung kommt. Das erste Szenario berücksichtigt unter anderem auch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung (CCS). Das zweite Szenario kommt ohne diese Technologie aus. Das dritte Szenario beinhaltet zusätzlich eine Begrenzung des Energieverbrauchs. In allen drei Szenarien liegen die Kosten der Dekarbonisierung im Bereich von einem Prozent des verfügbaren Einkommens, obschon sie mit der Abkehr von der Kernenergie einhergehen.

Ist es technisch und wirtschaftlich möglich, den CO<sub>2</sub>-Ausstoss bis 2050 so einzuschränken, dass die Klimaerwärmung unter zwei Grad Celsius gehalten werden kann? Diese Frage haben sich das Sustainable Development Solutions Network der UNO sowie das Institut für nachhaltige Entwicklung und internationale Beziehungen (IDDRI) gestellt. Mehr als 30 Forschungsteams haben sich auf der Plattform «Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP)»<sup>1</sup> zusammengeschlossen. Die Teams stammen aus 15 Ländern, die zusammen für 70% der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Sie haben es sich zur Aufgabe gemacht, Wege zu einer tiefgreifenden Dekarbonisierung ihrer Länder aufzuzeigen und deren Machbarkeit zu überprüfen. In der Schweiz hat das Bundesamt für Umwelt (Bafu) dieses Mandat der ETH Lausanne und Infras übertragen.

Ziel ist es, die energiegebundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Einwohner bis 2050 auf jährlich eine Tonne zu reduzieren. Heute liegen sie bei 5,1 Tonnen. Die Reduktion würde demnach 76% im Vergleich zu 1990 betragen (ohne internationalen Flugverkehr). Der Gesamtausstoss der Schweiz würde nur noch bei 9,8 Millionen Tonnen liegen.

In einem Referenzszenario, das ausschliesslich auf bereits getroffenen Beschlüssen basiert, wurde die Wirtschaftsentwicklung der Schweiz bis 2050 beschrieben. Die Dekarbonisierungsszenarien (DDP-Szenarien) beinhalten weitere Massnahmen zur Erreichung des definierten Ziels. Sie werden anhand ihres Abstands zum Referenzszenario beurteilt.

## Das Referenzszenario: 20 Prozent weniger CO<sub>2</sub> im Jahr 2020

Im Referenzszenario sinken die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 um 20% gegenüber 1990. Die heute vorgesehenen ökonomischen Instrumente sind: CO<sub>2</sub>-Abgabe auf Brennstoffe, Emissionshandelsystem für energieintensive Unternehmen (EHS), Massnahmen im Baubereich, Reduktion der mittleren CO<sub>2</sub>-Ausstosses von Neuwagen auf 95 Gramm pro Kilometer und Kompensation von bis zu 10% der Emissionen der importierten Treibstoffe. Wir gehen davon aus, dass diese Massnahmen ab 2020 auf dem dannzumal erreichten Niveau weitergeführt werden.

Weiter nehmen wir an, dass die Kernkraftwerke laufend abgeschaltet werden: Mühleberg 2019 und die anderen vier nach jeweils 60 Jahren Laufzeit – das letzte somit im Jahr 2044. Elektrofahrzeuge sollten im Jahr 2020 5% und 30 Jahre später 40% des Fahrzeugparks ausmachen.

## Berechnungsmodell basiert auf langsamerem Wachstum

Um die verschiedenen Szenarien zu simulieren und die zur Zielerreichung eingesetzten Instrumente zu evaluieren, wurde das berechenbare makroökonomische Gleichgewichtsmodell

<sup>1</sup> Siehe [www.deepdecarbonization.org](http://www.deepdecarbonization.org).

*Gemini-E3* verwendet, das an der ETH Lausanne entwickelt worden ist.<sup>2</sup> Alle Szenarien benützen dabei dieselben Hypothesen zur nationalen und globalen wirtschaftlichen Entwicklung bis 2050: Das Wirtschaftswachstum der Schweiz verlangsamt sich von 1,3% auf 0,7%, und die Bevölkerung erreicht 9,82 Millionen Personen. Der Erdölpreis steigt auf 162 Dollar pro Barrel und der Erdgaspreis auf 15,1 Dollar pro Million British Thermal Units (BTU) an.<sup>3</sup>

Für die Stromproduktion, insbesondere die erneuerbaren Energien, wurden die von *Prognos* (2012) geschätzten Kosten pro Energieträger sowie die Schätzungen der jeweiligen Potenziale gemäss Bundesamt für Energie (BFE) verwendet.<sup>4</sup> Ab 2025 wird es technisch möglich sein, CO<sub>2</sub> abzuscheiden und zu speichern (*Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS*). Die Kosten dafür belaufen sich auf 100 Dollar<sup>5</sup> pro Tonne CO<sub>2</sub>.

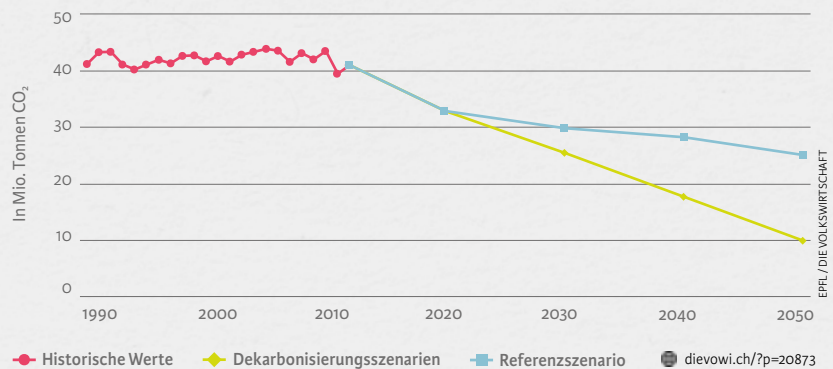
### Drei Szenarien ab 2021

Die Simulation des Referenzszenarios legt nahe, dass bis 2020 eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20% gegenüber 1990 möglich ist. Dazu muss die CO<sub>2</sub>-Abgabe auf dem aktuellen Niveau von 60 Franken pro Tonne beibehalten und die Abgabe auf Treibstoffe um 2 Rappen pro Liter erhöht werden, um die nationalen und internationalen Kompensationen zu finanzieren. Der Preis des CO<sub>2</sub>-Zertifikats auf dem Emissionshandelsmarkt muss auf 40 Franken ansteigen, wenn man von einer effizienten Allokation und dem Kauf von Zertifikaten durch die neuen Gaskraftwerke ausgeht. Ist dies der Fall, nehmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen kontinuierlich bis auf 25 Millionen Tonnen im Jahr 2050 ab; das sind 39 Prozent weniger als 1990 (siehe *Abbildung 1*). Der Stromverbrauch nimmt um 0,3 Prozent zu, dies hauptsächlich aufgrund der Verbreitung von Stromfahrzeugen und von Wärmepumpen.

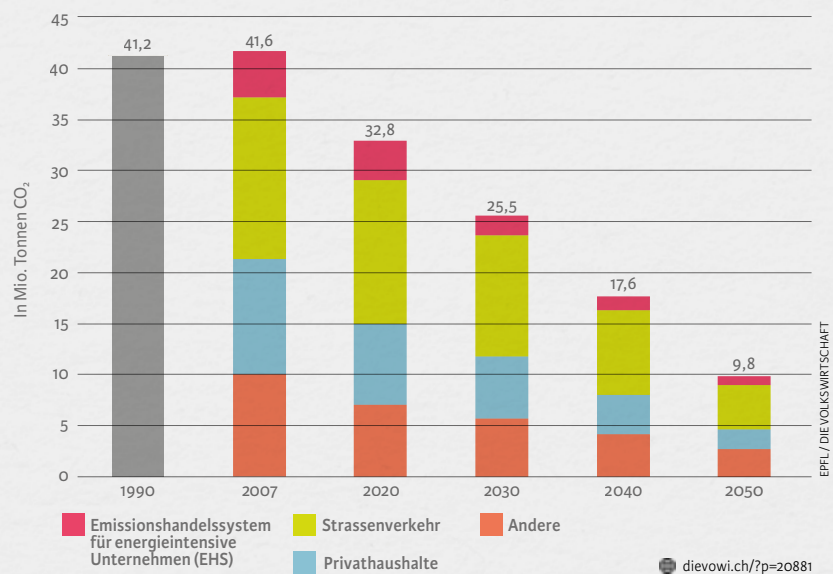
### Das erste Szenario mit Einbezug von CCS

Im Referenzszenario sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen immer noch zweieinhalbmal höher als das Ziel von einer Tonne pro Einwohner. Deshalb ersetzt das erste DDP-Szenario ab 2021 die bestehenden Instrumente durch eine umfassende und

**Abb. 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen im Energiebereich (ohne internationalen Luftverkehr)**



**Abb. 2: Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im ersten DDP-Szenario (ohne internationalen Luftverkehr)**



Keine detaillierten Angaben für 1990 erhältlich.

einheitliche CO<sub>2</sub>-Abgabe. Diese ist zielgerichtet und wird vollumfänglich rückverteilt; sie ist also viel «klarer» als die Klimaabgabe, wie sie im «Lenkungssystem im Klima- und Energiebereich (Kels)» vorgesehen ist. Da sie ihre Wirkung erst ab 2021 entfaltet, muss sie rasch ansteigen und 2030 bei 257 Franken pro Tonne CO<sub>2</sub> liegen. Dieser Preis liegt etwa in der Mitte zwischen der Treibstoffabgabe und der Brennstoffabgabe, die vom Beratungs- und Forschungsunternehmen Ecoplan zur Umsetzung des ambitioniertesten Lenkungssystems berechnet worden ist.<sup>6</sup> Die CO<sub>2</sub>-Reduktion beträgt damit 40 Prozent gegenüber 1990, was dem im Kels anvisierten Ziel entspricht.

- 2 Bernard und Vielle (2008).
- 3 Wert des US-Dollars im Jahr 2012 (USD2012).
- 4 BFE (2012).
- 5 USD2012.
- 6 Szenario K 4 des Bundesrates. Vgl. dazu Beitrag von Martin Baur, Matthias Gysler und Isabel Junker sowie Artikel von André Müller und Christoph Böhringer in dieser Ausgabe.





Kubus an der Klimakonferenz in Kopenhagen 2009. Der Würfel symbolisiert eine Tonne CO<sub>2</sub>.

Die Abgabe wird danach weiter erhöht, bis sie den Benzinpreis um den Faktor 2,4 und den Heizölpreis um den Faktor 4,4 multipliziert. *Bretschger et al. (2011)* mussten ebenfalls den Heizölpreis um den Faktor vier erhöhen, um eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen von 80% zu erreichen. Zu diesem Preis werden die Emissionen der Gaskombikraftwerke ab 2025 vollumfänglich abgeschieden. Kumuliert über die Periode 2025–2050 entspricht dies 77 MtCO<sub>2</sub> oder 3% der Kapazität des geologischen Reservoirs in der Schweiz gemäss *Diamond et al. (2010)*. Die Dekarbonisierung der Schweizer Wirtschaft (siehe *Abbildung 2*) erfolgt teilweise durch einen Mehrkonsum von Strom, der aus Erdgas und erneuerbaren Ener-

gien (ihr Potenzial wird zu 100 Prozent ausgeschöpft) produziert wird. Im Jahr 2050 werden 90 TWh Strom produziert; das entspricht einer Steigerung um 15% gegenüber dem Referenzszenario. Der Anteil des Stroms aus Erdgas beträgt 21 TWh.

Wie man sieht, verursacht dieses Szenario Kosten, die sich auf die Wohlfahrt der Haushalte auswirken. Die Wohlfahrt ist jedoch eine rein subjektive Einschätzung und eignet sich deshalb nur zu Einordnungszwecken. Gemeint ist etwa folgende Fragestellung: Führen die Substitutionsszenarien zu einem schlechteren, gleich guten oder besseren Zustand gegenüber dem Referenzszenario? Um eine Referenzzahl

zu erhalten, wurde nach der Abweichung des verfügbaren Einkommens gesucht, welche die im Referenzszenario definierte Wohlfahrt in der gleichen Grössenordnung verändert.<sup>7</sup> Der Einfluss auf das BIP ist leicht geringer, und die positiven Umweltwirkungen bleiben unberücksichtigt. Somit kostet das DDP-Szenario im Jahr 2030 0,4% des verfügbaren Einkommens und 1,7% im Jahr 2050. Davon ist die Steigerung der Einkommen von 38% pro Kopf bis 2050 gegenüber 2010 abzuziehen. Dieses Resultat bestätigt die Haupteckdaten von *Bretschger und Ramer (2012)*: Die Schweiz kann ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen massiv reduzieren, ohne ihre Wirtschaft zu gefährden. Dabei kann sie ihre Offenheit gegenüber einer Welt bewahren, die nicht unbedingt den Dekarbonisierungspfad einschlägt.

### Ein zweites Szenario ohne CCS

Das erste DDP-Szenario setzt ein beträchtliches Ausmass an Abscheidung und Speicherung von CO<sub>2</sub> voraus, um das gesteckte Ziel erreichen zu können. Dieses Vorgehen ist jedoch mit einer Reihe von – technologischen, wirtschaftlichen und anderen – Unsicherheiten behaftet. Die soziale

Akzeptanz ist umso unsicherer, als sich die Lagerstätten in der Schweiz unter den urbanen Regionen befinden. Deshalb haben wir ein *zweites Szenario* entworfen, das ohne diese Technologie auskommt.

Da das gesamte Potenzial der erneuerbaren Energien bereits zur Stromproduktion eingesetzt wird, sind Gaskombikraftwerke unverzichtbar. Deren CO<sub>2</sub>-Emissionen können nun aber nicht unterirdisch gelagert werden. Somit muss die CO<sub>2</sub>-Abgabe gegenüber dem ersten DDP-Szenario beinahe verdoppelt werden, um die anderen Wirtschaftsbranchen und die Haushalte dazu zu bringen, zusätzliche Anstrengungen zu unternehmen. Eine Abgabe in dieser Höhe bremst aber auch den Anstieg des Stromverbrauchs, der nun das Niveau des Referenzszenarios nicht mehr übertrifft. Die Kosten für die Wirtschaft sind mit 1,9% im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzszenario nicht sehr viel höher.

### Ein drittes Szenario mit CCS und Begrenzung des Stromverbrauchs

Das erste DDP-Szenario erreicht die Dekarbonisierung nicht nur mithilfe der CCS, sondern auch

<sup>7</sup> Die Aussage, dass das Referenzszenario 1% des verfügbaren Einkommens kostet, bedeutet also, dass es die gleiche Wirkung auf die Wohlfahrt der Haushalte hat, wie wenn ihnen 1% des verfügbaren Einkommens entzogen wird. Dabei ist zu beachten, dass das verfügbare Einkommen nur eine Referenzzahl ist, die es ermöglicht, das Wohlfahrts- (oder Wohlstands-)Niveau auf einfache Art und Weise einzustufen. Der Wohlfahrtsbegriff selbst beinhaltet weit mehr Parameter, von denen einige nicht absolut gemessen werden können.

Ein Verkäufer zeigt einem Kunden in Oslo ein Elektroauto. Die norwegische Hauptstadt weist eine hohe Dichte an solchen Fahrzeugen auf.



KEYSTONE



mit einer beschleunigten Elektrifizierung der Wirtschaft. Dass damit die Erdgasimporte zunehmen, läuft einem anderen Ziel zuwider, nämlich der Reduktion der energetischen Auslandsabhängigkeit der Schweiz. Das dritte Szenario fügt deshalb der CCS das Element einer Begrenzung des Stromverbrauchs hinzu. Die Revision des Energiegesetzes sieht vor, dass der Stromverbrauch pro Einwohner um 3% bis 2020 und um 13% bis 2035 gegenüber dem Stand im Jahr 2000 sinkt. Diese Ziele wurden bis zu einer Abnahme von 18% im Jahr 2050 verlängert. Das entspricht einem Höchstverbrauch von jährlich 63 TWh, der ohne den Einsatz von Erdgas gedeckt werden kann.

Dieses Ziel lässt sich mit einer Abgabe auf den Vorleistungs- und Endverbrauch von Strom erreichen, die zusätzlich zur CO<sub>2</sub>-Abgabe erhoben wird. Der Strom wird damit im Jahr 2050 um 88% verteuert. Das Niveau der CO<sub>2</sub>-Abgabe liegt zwischen dem ersten und dem zweiten Szenario. Die Kosten für die Wirtschaft sind mit 1,5% gegenüber dem Referenzszenario im Jahr 2050 geringer als in den anderen Szenarien. Dies erklärt sich einerseits damit, dass auf Gasimporte verzichtet werden kann, und andererseits mit einer Verbreiterung der Steuerbasis.<sup>8</sup>

## Ein ehrgeiziges, aber ohne schädliche Folgen erreichbares Ziel

Die Simulationen haben aufgezeigt, dass das Ziel eines Verbrauchs von einer Tonne energiegebundenes CO<sub>2</sub> pro Einwohner bis zum Jahr 2050 ehrgeizig, aber erreichbar ist, auch wenn gleichzeitig

die Kernenergie aufgegeben wird. Die kumulierten Kosten 2020–2050 entsprechen einer Einbusse des verfügbaren Einkommens der Haushalte von rund einem Prozent. Dass die Kosten niedrig bleiben, liegt an der umfassenden CO<sub>2</sub>-Abgabe, die falls nötig mit einer Stromabgabe kombiniert werden kann. Dieses System bringt für alle Wirtschaftsbranchen Anreize, ihre Energieeffizienz zu steigern, die fossilen Energien durch Elektrizität zu ersetzen und das Potenzial der erneuerbaren Energien voll auszuschöpfen. Schliesslich zeigen wir auf, dass das Ziel der tiefgreifenden Dekarbonisierung auf verschiedenen Wegen erreichbar ist: mit oder ohne CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung sowie mit oder ohne Beschränkung des Stromverbrauchs. Die Wahl der Optionen wird zwar die Zukunft des schweizerischen Energiesystems entscheidend prägen, ohne jedoch die makroökonomischen Kosten signifikant zu erhöhen.



**Philippe Thalmann**

Professor, Lehrstuhl für Städte- und Umweltökonomie LEURE, Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne EPFL.

**Marc Vielle**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Städte- und Umweltökonomie LEURE, Eidgenössische Technische Hochschule Lausanne EPFL.

8 Maire et al. (2015).

## Literatur

Bernard, A., Vielle (2008). M.: Gemini-E3, A General Equilibrium Model of International National Interactions Between Economy, Energy and the Environment, in: Computational Management Science, 5(3), S. 173–206.

BFE (2014). Das Potenzial der erneuerbaren Energien bei der Elektrizitätsproduktion. Bericht des Bundesrates an die Bundesversammlung nach Art. 28b, Absatz 2 des Energiegesetzes, 2012, adaptiert durch INFRAS basierend auf R. Bacher et al., EnergieRespekt. Der Schlüssel für eine Nachhaltige Energieversorgung, Zürich, Faktor Verlag.

Bretschger (2012). L., Ramer R.: Kosten und Nutzen eines ehrgeizigen Klimaziels, in: OcCC (Hrsg.): Klimaziele und Emissionsreduktion. Eine Analyse und politische Vision für die Schweiz, Bern, OcCC – Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung, S. 53–62.

Diamond L.W., Leu W., Chevalier G. (2010). Potential for Geological Sequestration of CO<sub>2</sub> in Switzerland. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Bern.

Maire S., Pattupara R., Ramachandran K., Vielle M., Vöhringer F. (2015). Electricity Markets and Trade in Switzerland and its Neighbouring Countries (Electra). Technical Report, Econability, PSI, EPFL.

Prognos (2015). Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050 – Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000–2050. Studie im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Basel.